大はしあたけの夕立

P4398
1

n°113

INRA mensuel

Dossier, juin 2002

Changement climatique et effet de serre

INRA

Changement climatique et effet de serre

Avant-propos

Les interrogations sur un changement de climat, résultant de l'influence de l'homme sur l'effet de serre, illustrent de façon très concrète les multiples facettes des relations entre connaissances et interventions de la société.

D'un point de vue scientifique, ce phénomène, sur lequel l'alerte a été donnée par les chercheurs eux-mêmes, fait l'objet de débats : entre les tenants d'un refroidissement sur le long terme à partir des évolutions naturelles mis en avant dans les années 80 ou, à l'inverse, d'un réchauffement par le biais de l'action humaine, sur lequel les avis semblent converger aujourd'hui.

Sommaire

À l'échelle internationale, des décisions ont été prises à Rio en 1992, à Kyoto en 1997 puis à La Haye en 2001, essentiellement fondées sur des mesures destinées à réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Les simplifications médiatiques, soulignées d'images chocs, donnent en général une connotation de catastrophe au changement de climat alors que la gamme de ses conséquences éventuelles est très large : nouvelles cultures dans des régions froides, adaptation des espèces végétales et animales à un processus assez long... aussi bien qu'inondations, tempêtes, accroissement de la sécheresse, déplacements de populations...

Un travail de recherche, à la fois fondamental et appliqué, est là plus que jamais essentiel afin d'évaluer la réalité de ce phénomène et de démêler ce qui est lié aux activités humaines et ce qui est phénomène naturel. Avec rigueur, sans catastrophisme car les enjeux sont lourds : différents choix de croissance, modes de développement et inégalités entre pays du Nord et du Sud, modes de vie de chacun comme d'une société entière, politiques à l'échelle des pays et du monde.

Un phénomène difficile à établir

Il est nécessaire de construire un ensemble de connaissances, fondées sur ce qui s'est passé dans les temps les plus reculés avec toutes les difficultés que cela représente afin d'envisager les multiples scénarios possibles ; sans oublier qu'ils ne résultent que de modèles, forcément simplificateurs. L'analyse de carottes de glace très profondes, obtenues récemment grâce à des technologies très performantes, a permis de faire progresser ce savoir.

Il s'agit d'un phénomène particulièrement difficile à établir pour de multiples raisons : ses causes et ses conséquences se situent à des échelles spatiales couvrant tout le continuum des parcelles à la planète entière et faisant intervenir aussi bien le continent que l'océan.

Des **causes** ont été identifiées :

• liées aux activités humaines :
- l'habitat et son mode de chauffage avec la consommation d'énergies fossiles, pétrole et charbon
- l'exploitation agricole : pratiques agricoles, élevages, cultures...
- l'occupation du sol : déforestation, feux, aménagement du territoire, politiques agricole et forestière
- l'industrie, le commerce et les transports publics et privés amplifiés par la mondialisation.

Cela pour l'ensemble des pays de tous les continents, dont les cultures et les niveaux de vie, donc leurs pratiques, diffèrent ; ce qui renvoie à des savoirs nécessaires et à des politiques à mettre en œuvre.

• d'origine naturelle :
- activité solaire
- éruptions volcaniques
...

Les **conséquences** d'un éventuel changement climatique peuvent se faire sentir aussi bien dans un lieu très précis (mini-tornades par exemple) qu'à l'échelle de plusieurs continents : fonte des glaciers aux pôles, avancées de la forêt et des régions cultivables, modifications des types de cultures, recul ou développement des déserts, terres inondées...

Il se situe à des **échelles de temps** extrêmement diverses, très longues (des dizaines à des centaines d'années) pour les processus et très brèves pour les décisions politiques : limiter maintenant les émissions de CO_2 n'aura d'effets que dans vingt à trente ans sur le CO_2 atmosphérique et dans cinquante ans sur le climat.

Difficile à faire percevoir

Ce sujet est d'autant plus difficile à faire percevoir dans toute son ampleur à la société que, comme nous venons de le voir :



Photo : ©RMN

Paysage avec une rivière et une baie dans le lointain. Joseph Mallord William Turner (1775-1851), huile sur toile.

• il fait appel à des "objets" que l'on croit "familiers", tels les nuages, la pluie, la température...
• ses causes, imperceptibles à court terme, agissent sur la durée, pour induire des conséquences qui peuvent être visibles et brutales, à des échelles de temps longues. Quels sont les liens entre un mode de vie, des comportements individuels et ce phénomène global ?

Quelles recherches à l'INRA ?

Il est ainsi essentiel de faire percevoir **quelles questions de recherches** complexes recouvrent ces notions simples en apparence d'effet de serre et de changements climatiques : elles impliquent des connaissances venant d'un ensemble de disciplines allant de la sélection de variétés végétales et animales à l'émergence de nouvelles pathologies, des dispositifs expérimentaux de très longue durée, des outils très puissants, des simulations et un aller-retour des modèles à l'expérimentation. Il s'agit à la fois de recherches spécifiques, de mises au point de méthodes pour mesurer des phénomènes difficiles à quantifier mais également de développer la dimension "environnement" d'un ensemble d'autres recherches dont il est indispensable d'évaluer les conséquences écologiques.

Il n'est pas question d'aborder ici l'ensemble du phénomène de l'effet de serre à l'échelle mondiale mais, parmi les causes invoquées, de mieux comprendre le rôle de l'agriculture et de la forêt en France dans l'émission de gaz à effet de serre ainsi que de mieux connaître les effets des changements climatiques sur l'agriculture et la forêt.

Dans ce texte, nous nous interrogerons donc sur les thèmes de recherche concernant l'effet de serre à l'INRA, qui appelle des travaux spécifiques mais aussi à construire en partenariat, ne serait-ce qu'en raison de l'ampleur du problème et de la multiplicité de ses facettes.

Denise Grail

Changement climatique et effet de serre
Bref état des problèmes et des recherches à l'INRA

En l'espace de deux décennies, l'effet de serre est devenu un sujet de préoccupation à l'échelle de la planète. Il est vrai que sa modification par l'activité humaine a pour résultante de perturber l'équilibre climatique de la terre et conduit donc à envisager les perspectives d'un changement du climat au niveau mondial. C'est maintenant une question largement évoquée, au-delà du milieu scientifique, dans l'opinion publique à travers les médias. Que fait l'INRA dans ce domaine ? Nous allons essayer de répondre à ces questions, en rappelant d'abord les bases et le développement du problème, puis en présentant de manière synthétique les recherches passées et en cours.



Photo : René Canta

Coupe de bois de robinier. L'épaisseur des cernes de bois est un indicateur qui intègre les conditions climatiques.

Un peu... mais pas plus... de physique et d'histoire (récente)

L'effet de serre est au départ un phénomène étudié en sciences agronomiques par les spécialistes de bioclimatologie. Il est mis en pratique depuis fort longtemps en horticulture avec les serres en verre.

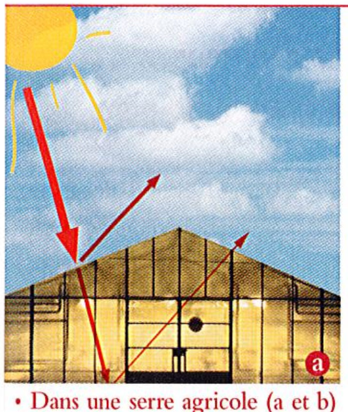
L'effet de serre désigne, à l'origine, le processus d'interception du rayonnement infrarouge dit "thermique" (parce que lié à la température) émis naturellement et de manière permanente par les surfaces terrestres. Ce rayonnement (en gros, 8 à 14 μm), de longueur d'onde supérieure à celle du rayonnement solaire, reste invisible alors que la lumière visible concerne surtout les longueurs d'onde de 0,4 à 0,8 μm qui ne peuvent provenir que du soleil. Il faut, pour le détecter, des instruments qui mesurent le signal émis ou qui peuvent en donner l'image reproduisant les variations liées à la température d'émission (appareils photo ou caméras).

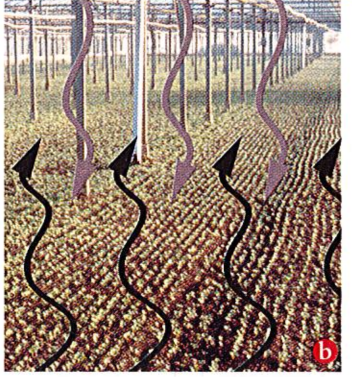
Mais on peut, par contre, en ressentir les conséquences : tout simplement, si la température baisse la nuit, c'est parce que la terre, de jour comme de nuit, émet un rayonnement thermique en direction de l'atmosphère. De jour, l'apport du rayonnement solaire dépasse très généralement cette perte et ce bilan positif conduit à un réchauffement de la terre. Par contre, de nuit, cette déperdition n'est plus compensée et la terre se refroidit.

D'où l'idée mise en pratique dans les serres de capter ce rayonnement thermique, avec une paroi de verre qui l'absorbe presque en totalité, mais laisse passer le rayonnement visible qui permet la photosynthèse [1]. Avec les couvertures plastiques, apparues parce qu'évidemment moins lourdes et moins coûteuses que le verre, il n'y a pratiquement pas d'"effet de serre" : le polyéthylène par exemple, laisse passer

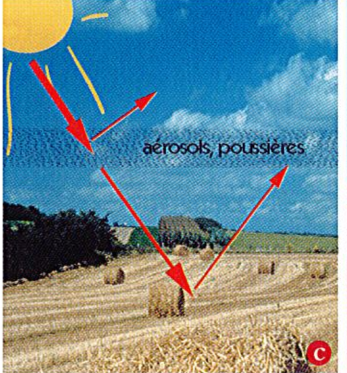
[1] **La photosynthèse,** un processus caractéristique du monde végétal mais rencontré aussi chez certaines bactéries, permet à ces organismes de collecter l'énergie de la lumière solaire puis de la convertir en énergie chimique, utilisable pour réaliser à partir de quelques éléments minéraux la synthèse de leurs propres constituants moléculaires (carbone, azote et soufre inorganiques) afin d'assurer leur croissance, leur développement et leur reproduction, indispensables à leur vie.

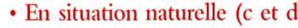
Fig.1 Représentation de l'effet de serre





• Dans une serre agricole (a et b)





• En situation naturelle (c et d)

L'atmosphère qui entoure la terre laisse arriver au sol environ 50% du rayonnement émis par le soleil, le restant est intercepté ou renvoyé vers l'espace en fonction de la présence de nuages et de particules (aérosols, poussières...). Une partie de ce rayonnement arrivant à la surface de la terre est absorbée par le sol et l'autre réfléchie **(fig.1c)**.
Par ailleurs, l'émission naturelle de rayonnement par la surface terrestre dans le domaine de l'infrarouge thermique représente une perte d'énergie qui contribue à la refroidir. Agissant telles les vitres d'une serre **(fig.1a et 1b)**, certains gaz présents naturellement dans l'atmosphère (essentiellement la vapeur d'eau, mais aussi le gaz carbonique...) empêchent directement ces rayonnements dans l'infrarouge thermique de s'échapper vers l'espace ; ce qui limite ce refroidissement et crée donc un effet de serre tendant à un réchauffement **(fig.1d)**.

le rayonnement thermique ; d'où le recours au PVC, ou à d'autres matériaux plastiques qui, eux, permettent l'"effet de serre".

Si l'on sort des serres, plus d'effet de serre ? … Bien sûr que si, parce que, dans l'atmosphère, même si elle paraît claire, des gaz absorbants (et au premier rang la vapeur d'eau), se chargent d'intercepter ce rayonnement émis par la terre. Il est encore plus présent dans le cas d'une couverture nuageuse, parce que l'eau liquide est très efficace (1 mm suffit pour une absorption presque totale). C'est l'effet de serre que l'on peut qualifier de naturel, qui existe depuis longtemps sans que l'on se pose trop de questions (à part les spécialistes de l'atmosphère), et grâce auquel nous vivons : s'il n'existait pas, la température d'équilibre (qui avoisine les +15°C) de la terre serait voisine de −15°C soit un écart de l'ordre de 30°C (fig. 1). C'est bien grâce à lui (ou à cause de lui, suivant les cas) que le refroidissement nocturne évoqué plus haut est très fortement limité en conditions nuageuses, et par ciel clair, moins prononcé lorsque l'atmosphère est chargée d'eau, d'où les idées de lutter contre le gel en créant des brouillards artificiels ou en pulvérisant des gouttelettes d'eau. C'est aussi pour cela qu'il fait si froid la nuit dans les déserts, l'effet de serre y étant faible en valeur relative à cause de la sécheresse de l'air.

Envisageait-on de pouvoir modifier le climat ?

À ce propos, vouloir lutter contre le gel en essayant de provoquer un brouillard artificiel sur quelques hectares (en priant le ciel pour qu'un léger vent ne se lève pas et ne le transporte, au mieux sur le champ du voisin, au pire vers l'autoroute voisine, est un exemple de ce que l'on pensait pouvoir modifier du climat dans les années 60. Puis dans les années 70, l'installation d'un plan d'eau ou de tours de réfrigération des centrales nucléaires, par exemple, a fait l'objet d'interrogations sur la modification résultante du climat local, au même titre que l'effet d'un brise-vent sur le microclimat. Certes, les questions posées sur les effets de l'arasement du bocage conduisaient à aller jusqu'à un effet possible à l'échelle d'une région, au même titre que l'introduction de l'irrigation sur de grandes surfaces. Mais au-delà, en dehors des interrogations du "café du commerce" sur la bombe atomique qui aurait détraqué le temps ou alors (plus subtil) l'aménagement du Rhône qui aurait ralenti le mistral… non, l'homme ne pouvait pas modifier le climat de la planète entière ; ce n'était pas concevable, l'écart était trop grand entre les échelles d'intervention humaine et les mécanismes gouvernant le climat à l'échelle de la planète. Bien sûr, les interrogations sur les famines des années 70 au Sahel amenaient à envisager une interaction réciproque entre désertification et sécheresse [2]. Il est vrai également que le développement de modèles climatiques, visant aussi bien à comprendre et à analyser les mécanismes si complexes qui déterminent le climat qu'à améliorer les prévisions météorologiques, permettait aussi de commencer à spéculer, dans les années 80, sur l'effet d'une déforestation à grande échelle comme en Amazonie. Mais de là à penser que l'homme était en train (et en plus depuis pas mal de temps) d'agir sur le climat à long terme ! …

Mise en évidence de l'augmentation du taux de CO2 dans l'atmosphère

C'est là qu'intervient l'effet de serre, qui agit lui de façon permanente et sur l'ensemble du globe. Car, au-delà de la vapeur d'eau (H_2O), un autre gaz à effet de serre est connu depuis longtemps. Il s'agit du gaz carbonique, (CO_2), qui nous est si familier puisque c'est lui que nous rejetons en respirant, et si utile puisque c'est lui qui, avec l'eau, sert d'élément de base à la production de la matière végétale dans la grande machine de la photosynthèse, alimentée par l'énergie lumineuse. Sous l'action de l'homme, le taux de CO_2 augmente régulièrement, non seu-

[2] Pas uniquement dans le sens où la sécheresse peut conduire à la désertification, mais avec l'hypothèse commençant à s'appuyer sur des modèles numériques, que les modifications des propriétés de réflectance des sols causées par la désertification sont susceptibles d'agir sur la pluviométrie en la réduisant.

lement au voisinage des agglomérations urbaines, mais à l'échelle de la planète : au départ simplement par l'utilisation du bois combustible accompagnant les défrichements et, plus largement, la déforestation, et en particulier depuis l'avènement à partir du XIXe siècle des activités industrielles : généralisation du chauffage, rejets d'industries diverses, circulation automobile... À partir d'un niveau de base historique au XIXe siècle, d'environ 280ppm (partie par million volumique), la concentration en CO_2 augmente à un rythme quasi exponentiel pour atteindre environ 360ppm à l'heure actuelle (soit une augmentation de l'ordre de 25%), niveau qui n'a jamais été atteint au cours des 160 000 dernières années [3] (fig.2).

[3] ... comme l'attestent les données bien connues maintenant du laboratoire de Mona Laua à Hawaï à partir de 1958 ou de l'île d'Amsterdam en Antarctique, complétées par les observations des carottes de glace.

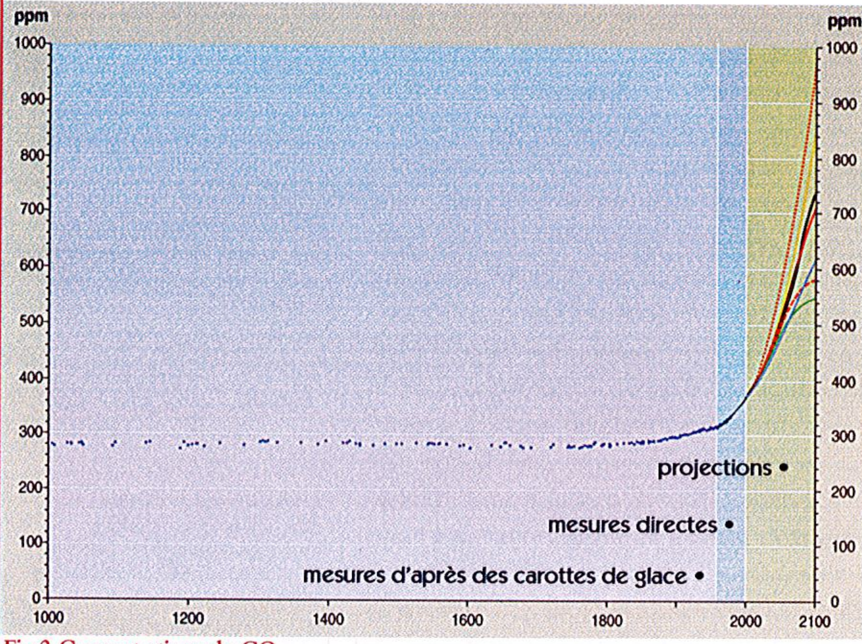


Fig.2 Concentrations de CO_2 dans l'atmosphère
• de l'an 1000 à 2000, d'après des mesures sur des carottes de glace
• de 2000 à 2100, projections selon divers scénarios.
D'après "Synthesis report" IPCC (en ligne).

[4] Dans la foulée de la conférence des Nations Unies sur l'Environnement à Stockholm en 1972, un premier programme intitulé GARP (Global Atmospheric Research Program) a vu le jour. L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) a organisé une première conférence mondiale sur le climat en 1979, qui a officialisé en quelque sorte le sérieux du questionnement sur l'effet de serre et le changement climatique. Elle a mis en place un programme de recherche sur le climat (PMRC, ou WCRP en anglais), complémentaire du programme PIGB (Programme International Géosphère Biosphère ou IGPB en anglais) visant à étudier en profondeur le fonctionnement des surfaces continentales et océaniques. Ces deux programmes sont toujours en place. Ils sont complétés par un grand nombre d'autres sur l'hydrologie, l'érosion... qu'il serait fastidieux d'énumérer ici.

Refroidissement ou réchauffement ?

La prise de conscience de cette augmentation du CO_2 atmosphérique à l'échelle planétaire a conduit à s'interroger sur ses conséquences possibles, puisque le CO_2 contribue pour environ 1/3 à l'effet de serre naturel. Nous avons vu que celui-ci se traduisait par un écart de l'ordre de 30°C pour la température de la Terre, et un calcul simple conduit, en prenant en compte une augmentation de CO_2 de 25%, à mettre en évidence un ordre de grandeur de 2,5°C d'accroissement de la température ; ce qui est tout à fait considérable à l'échelle planétaire.

Or, le contexte des années 70 penchait plutôt, dans le cercle des climatologues qui analysaient les évolutions des séries historiques sur des milliers d'années, vers une tendance à la prévision d'un refroidissement du climat à l'échelle des 100 ou 1000 années à venir. Pendant quelques années, la controverse s'est développée au sein de la communauté scientifique.

Vers un réchauffement du climat de grande ampleur

Grâce aux progrès de la modélisation du climat, cependant, les bases d'une prévision d'un réchauffement significatif dû à l'effet de serre se sont peu à peu affirmées. La grande nouveauté de la question posée était qu'elle concernait l'ensemble de la planète, et que la mobilisation de la communauté scientifique devait s'effectuer à l'échelle internationale : conférences mondiales, programmes de recherche sur le climat [4]. Des groupes d'experts spécialisés du groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC, en français, IPCC, International Panel on Climate Change, en anglais) ont été constitués, chargés d'élaborer à un rythme d'environ 5 années des rapports représentant la synthèse des connaissances sur le sujet. Au fil des rapports (le premier en 1991, le second en 1996 et le troisième publié en 2001), cette institution a pris une place considérable dans le débat sur l'effet de serre. Si le consensus très large dans la communauté scientifique que rencontre le mode de fonctionnement du GIEC, et par suite, ses conclusions, est encore contesté par certains, on peut dire qu'il a progressivement consolidé la probabilité de l'évolution du climat vers un réchauffement de grande ampleur.

Le débat est devenu progressivement politico-scientifique, car évidemment l'ampleur des conséquences possibles a progressivement mis l'effet de serre au premier rang des questions d'environnement : élévation du niveau de la mer, déplacement des aires de cultures et conséquences sur la production alimentaire, émergence et propagation des maladies... dont il faut bien préciser qu'*a priori*, ces conséquences peuvent être aussi bien positives que négatives. Les menaces sur les ressources naturelles (l'eau, le sol, l'atmosphère en termes de pollution) sont, bien sûr, des sujets de préoccupation aussi graves, mais qui portent moins directement à l'échelle planétaire. Et puisque c'est l'émission de CO_2 qui met en péril l'équilibre climatique, il apparaît indispensable d'essayer d'agir à cette même échelle. D'où les discussions, puis les marchandages, qui ont conduit de la conférence de Rio en 92 à celle de la Haye à l'automne 2000 puis de Marrakech au printemps 2001, après l'adoption du protocole de Kyoto en 97 et en attendant le sommet de Johannesburg l'été 2002. Du coup, l'effet de serre est devenu un véritable enjeu diplomatique, et les travaux sur le sujet sont maintenant inévitablement liés à cet enjeu, la recherche étant sollicitée pour fournir l'expertise


Photo : ©RMN-Franck Raux

Oasis à Korah (Sahara) 1857-1859
Gustave de Beaucorps (1825-1902)
musée d'Orsay.

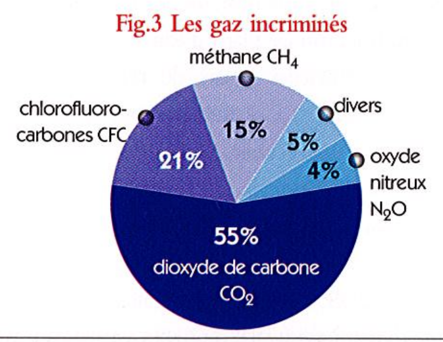
mobilisée par les pays pour défendre leur position ou riposter à celle prise par d'autres.

Les connaissances ont progressé : d'autres gaz que le CO2 impliqués, modélisation...

Pour en terminer avec cette présentation générale du sujet et des enjeux, ajoutons quelques éléments d'information sur la progression des travaux.
Si le CO_2 est le gaz qui a historiquement déclenché la réflexion sur l'effet de serre, d'autres gaz sont apparus comme susceptibles de jouer un rôle significatif : les chlorofluorocarbones (CFC) et l'ozone (O_3), d'origine en grande partie industrielle, mais aussi l'oxyde nitreux (N_2O) et le méthane (CH_4), ces deux gaz en grande partie liés à l'activité agricole. Ces différents gaz ont un pouvoir de réchauffement beaucoup plus élevé que celui du CO_2 et une contribution relative non négligeable (fig.3). Comme leur durée de séjour dans l'atmosphère (à part le méthane, 10 ans) est de l'ordre du siècle, on voit l'urgence de prendre des mesures rapidement.
Les préoccupations sur l'avenir ont énormément stimulé la recherche sur le climat du passé et son explication, relançant l'intérêt pour la paléoclimatologie, qui apporte une contribution importante au débat, à partir de l'analyse simultanée des données historiques reconstituées de la température et de la teneur en CO_2 de l'atmosphère, par exemple.

Sur un autre plan, les modèles simulant le climat ont énormément progressé dans la description des processus élémentaires mis en jeu, bien sûr au niveau de l'atmosphère (en particulier l'interaction avec les nuages, la prise en compte des aérosols)... mais aussi au niveau du fonctionnement des systèmes océaniques et continentaux. Le cycle du carbone a ainsi fait l'objet d'un intérêt renouvelé, sachant que le décompte des sources (sites d'émission de CO_2) et des puits (sites d'absorption de CO_2) est maintenant l'objet d'une contribution prise en compte dans les engagements des pays d'après Kyoto, malgré les incertitudes encore grandes sur le rôle précis de la biosphère continentale, (qui est suspectée de constituer en tout ou partie le puits manquant de l'ordre

Fig.3 Les gaz incriminés



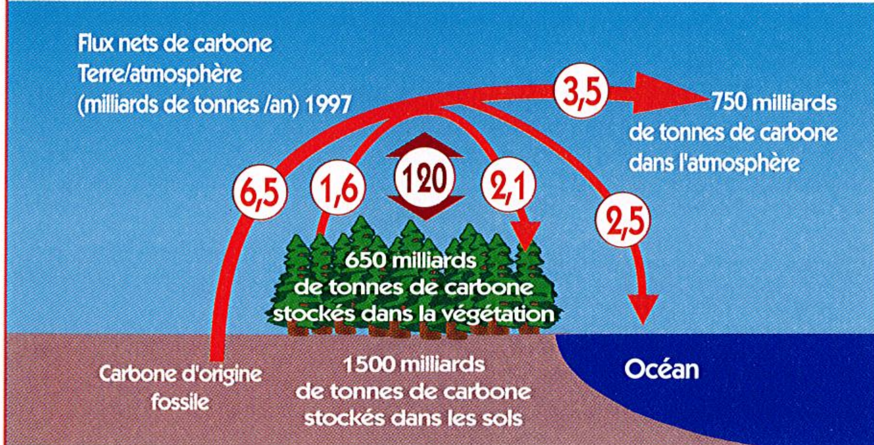
Type de gaz	CO_2	CH_4	N_2O	CFC_{11}	CFC_{12}
• Avant la période industrielle	280	0,80	288	0	0
• Actuellement (1990)	354	1,70	310	280	484
• Accroissement annuel de concentration	0,5%	0,9%	0,25%	4%	4%
• Durée du séjour dans l'atmosphère (an)	50-200	10	150	60	120
• Pouvoir radiatif relatif/CO_2	1	32	160	14000	17000

D'après Guyot 1997.

de 1 à 2 milliards de tonnes/an dans le bilan global) (fig.4).

Autant d'éléments qui font intervenir à la fois l'agriculture et la forêt, et qui nous conduisent maintenant à évoquer les contributions de l'INRA à ce grand débat.

Fig.4 Carbone des sols et bilan planétaire du carbone



D'après D. Arrouays, J. Balesdent, 2001.

Quelle a été la contribution de l'INRA ?

(voir en fin d'article, les différents travaux signalés)

Les conséquences d'un réchauffement climatique Des recherches en bioclimatologie

Bien évidemment, les questions posées sur le changement climatique concernaient, au premier rang, les bioclimatologistes, qu'ils appartiennent au département de bioclimatologie *sensu stricto* ou à celui des recherches forestières.

En bioclimatologie, les années 70 avaient vu, en particulier à Avignon, un ensemble de travaux sur les modifications du climat local liées à des opérations d'aménagement (remembrement et arasement des haies, implantation de plans d'eau…) ou à des installations industrielles (tours de réfrigération des centrales nucléaires). Ces études ne portaient cependant que sur une échelle locale (de l'ordre de 10 km), au mieux régionale (de l'ordre de 100 km), et il apparaissait clairement que la modélisation du climat global ne pouvait être que du ressort de laboratoires spécialisés, tels que le laboratoire de Météorologie dynamique (LMD) du CNRS à Palaiseau, avec lesquels des contacts réguliers étaient établis par le biais de la chaire de bioclimatologie de l'INA-PGG à Grignon dirigée par Alain Perrier. La contribution de l'INRA sur ce point a porté sur l'amélioration de la prise en compte du fonctionnement énergétique et hydrique des surfaces terrestres dans les modèles de climat. Par ailleurs, le programme Agrotech mis en place par Jean-Claude Rémy, alors directeur scientifique du secteur Environnement physique et Agronomie (EPA), complété par le projet "Écosystèmes et changements globaux" dans le cadre du programme Environnement du CNRS, avec l'appui du comité français du PIGB a soutenu les efforts de mesure des flux énergétiques et hydriques et de leur modélisation, en visant à développer des outils et des méthodes pour le passage de la parcelle à l'échelle régionale. Dans ce cadre, l'apport des capteurs spatiaux permettant d'évaluer ce fonctionnement à l'échelle planétaire a conduit l'INRA à développer l'utilisation de satellites météorologiques tels que Météosat ou NOAA-AVHRR et a contribué à définir une nouvelle génération d'instruments tels que le capteur VEGETATION sur SPOT 4 et 5. Ces deux aspects, échanges énergétiques et liens avec le bilan hydrique, utilisation de la télédétection pour le suivi de la végétation, la production de biomasse et la cartographie des flux de surface, ont conduit à une participation de nature plutôt diffuse, mais continue de l'INRA à la communauté (en grande partie CNRS) travaillant sur le fonctionnement de la biosphère continentale et son observation par satellite (fortement soutenue par le CNES).

Par ailleurs, et toujours dans le domaine de la bioclimatologie Richard Delécolle à Avignon, Ghislain Gosse et Françoise Ruget à Grignon, un apport spécifique a résulté de l'expertise acquise sur les modèles mécanistes de fonctionnement de cultures, d'abord en adaptant les modèles mis au point aux USA (la famille des "Ceres" sur différentes cultures), aux Pays-Bas ou en Grande-Bretagne. À partir de scénarios climatiques sur le réchauffement, qui commençaient à apparaître, il a été possible d'effectuer de premières évaluations, qui ont ensuite été peu à peu approfondies en s'appuyant cette fois sur un modèle permettant de simuler le fonctionnement des cultures à l'échelle de temps journalière, STICS (initié et développé dans l'unité de Bioclimatologie, Avignon, avec la contribution d'un grand nombre de labos INRA, mais aussi de l'ITCF, AGPM, du CIRAD, du CEMAGREF…).

L'apport de l'écophysiologie

Dans les développements les plus récents, ces simulations à l'aide de scénarios ont incorporé les conséquences, non seulement du réchauffement, mais aussi du doublement du CO_2. Cet aspect est également un point auquel l'INRA a contribué vers le début des années 90, en mobilisant ses compétences d'écophysiologie dans le cadre du programme Agrotech.

C'est essentiellement la station de Bioclimatologie de Grignon qui a réalisé ces travaux sur le maïs, avec la contribution de l'équipe d'Avignon travaux

d'Olivier Béthenod, Laurette Combe et Françoise Ruget travaillant sur les serres, puisque l'apport de CO_2 pour augmenter la photosynthèse est pratiqué en horticulture (fertilisation carbonée). En effet, indépendamment de l'effet indirect par le biais du réchauffement climatique, l'augmentation du CO_2 agit directement sur le fonctionnement biologique, en provoquant une stimulation de la production photosynthétique des végétaux, généralement accompagnée d'une baisse de la transpiration et, par suite, d'une augmentation de l'efficience de conversion de l'énergie lumineuse et d'utilisation de l'eau. Bien sûr, cette tendance générale prend des formes très diverses suivant les couverts végétaux et les conditions climatiques, mais les recherches effectuées tant en serres qu'en conditions naturelles ont permis d'obtenir des informations maintenant assez complètes. C'est ainsi que le dispositif installé sur la prairie à Clermont-Ferrand unité d'Agronomie, équipe de Jean-François Soussana dans le cadre d'un projet européen "Environnement et Climat" a permis d'évaluer les effets du doublement du CO_2 sur la productivité de la prairie qui augmente de l'ordre de 20%, quand elle est associée au réchauffement et sur la composition floristique (les légumineuses étant favorisées par rapport aux graminées).

De même, pour les forêts, les études expérimentales effectuées à Nancy équipe de Jean-Marc Guehl mettent en évidence des différences notables entre les espèces : l'augmentation de la concentration en CO_2 tend à réduire la transpiration chez un grand nombre d'espèces, dont le chêne. Par contre, cet effet n'existe pas dans le cas du pin maritime et du hêtre.

Et l'effet de serre ?

L'ensemble des travaux que nous venons de parcourir rapidement concerne l'impact des changements climatiques. Mais nous avons vu que les résultantes de l'effet de serre dépendent, en premier lieu bien sûr, des bilans de CO_2, ainsi que d'autres gaz à effet de serre, dont deux au moins sont fortement conditionnés par l'agriculture : le N_2O et le CH_4 (fig.5). S'il paraissait souhaitable de contribuer à l'effort collectif pour évaluer les effets de ce changement climatique éventuel, il n'apparaissait pas indiqué de trop s'y investir, les scénarios de réchauffement étant encore un peu au stade de la science fiction. Et puis, après tout, ceux-ci portaient sur la fin du XXIe siècle alors que l'action sur ces bilans de gaz à effet de serre pouvait être beaucoup plus immédiate. Pour que celle-ci soit envisagée, que ce soit à l'échelle d'un pays ou de la planète (et les discussions d'après Kyoto l'ont bien montré), il fallait d'abord que l'expertise collective sur ces bilans, (et en particulier, pour nous, ceux en rapport avec l'agriculture et les forêts) puisse s'appuyer sur des connaissances scientifiques solides. C'est sur cet axe que l'engagement de l'INRA dans la dernière décennie a été le plus fort.

- À propos de l'effet du CO_2

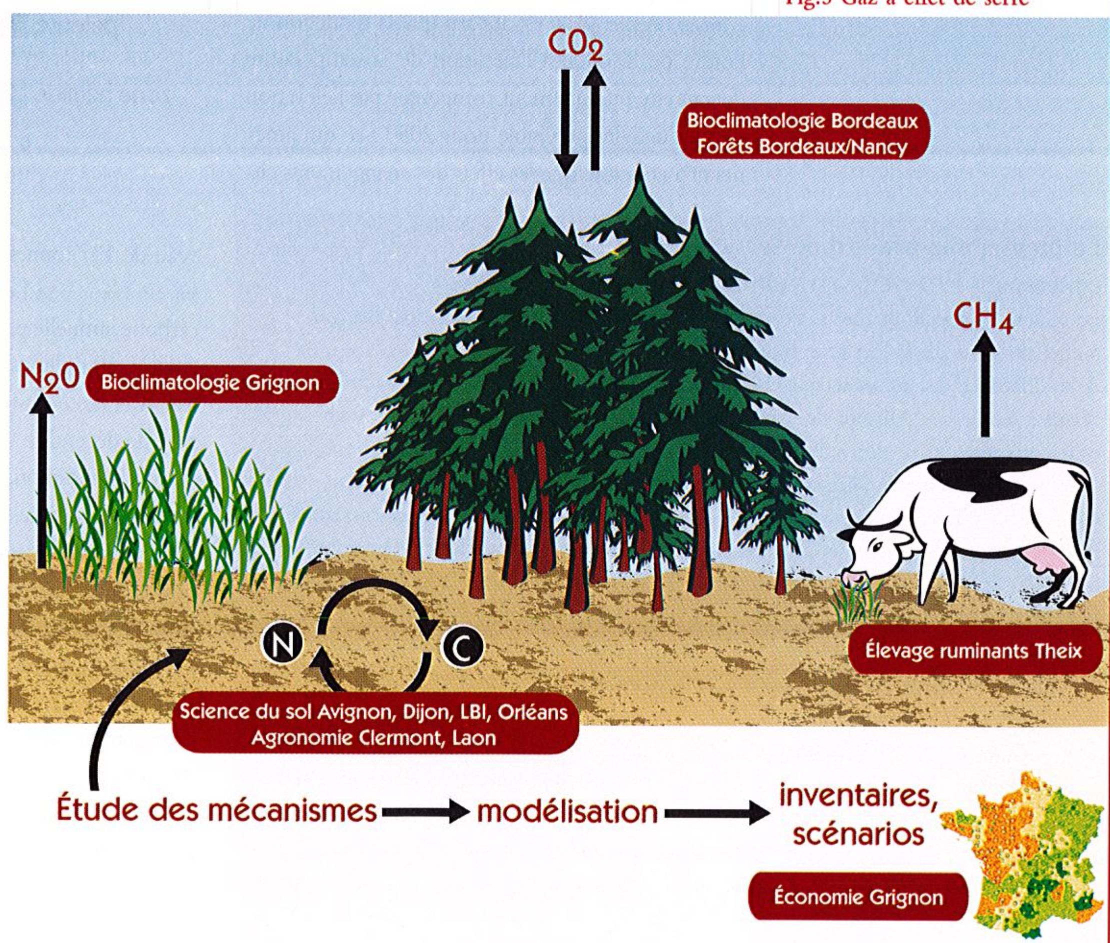
L'élément central, comme nous l'avons indiqué, était au départ le CO_2 ; ce qui a amené, plus généralement, à rechercher un approfondissement des connaissances sur le cycle du carbone.

Concernant la mesure directe des flux de CO_2, si celle-ci avait fait l'objet de développements méthodologiques permettant de l'évaluer à l'échelle de la parcelle et sur de courtes périodes de temps, il a fallu attendre la moitié des années 90 pour que des dispositifs permettent de l'évaluer de manière fiable sur l'ensemble d'une saison. Le programme européen Euroflux avec les équipes de Paul Berbigier en Bioclimatologie à

Stockage des gaz à effet de serre par les sols

Les sols sont capables de stocker d'importantes quantités de gaz carbonique de l'atmosphère par transformation en matière organique des végétaux ou des animaux en décomposition.
Ce phénomène dépend à la fois de paramètres écologiques comme le type de climat ou de sol... et du mode de travail du sol...
Certaines pratiques agricoles, fertilisation, irrigation... par exemple, accroissent sensiblement les flux d'autres gaz à effet de serre, tels le méthane et l'oxyde nitreux.

Fig.5 Gaz à effet de serre



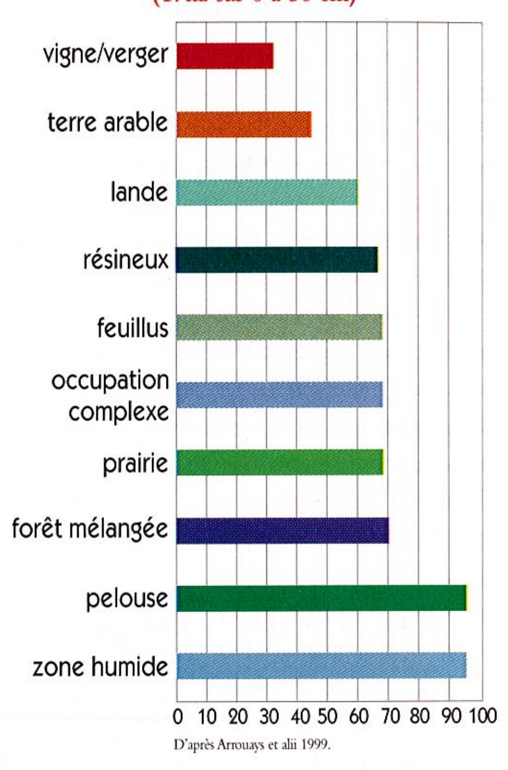
[5] Le Bray dans les Landes (Bioclimatologie Bordeaux avec l'appui de FMN) et Hesse en Lorraine (FMN Nancy), et un appui aux mesures sur la garrigue de Puechabon (CNRS Montpellier), une extension étant en cours sur le Congo et Vanuatu (CIRAD).

Bordeaux et d'André Granier à Nancy, a permis d'établir récemment une première estimation des flux échangés par les forêts au niveau européen, avec deux sites suivis par des équipes de l'INRA [5]. Des mesures similaires de flux de CO_2 sont maintenant développées sur les prairies dans le cadre d'un projet européen Greengrass (coordonné par l'unité d'Agronomie de Clermont-Ferrand, responsable J.-F. Soussana). L'équivalent n'existe pas encore sur les couverts agricoles, mais des perspèctives apparaissent au niveau du bassin parisien (EGC Grignon). De façon plus globale, ces travaux ont permis d'obtenir à l'INRA, des éléments significatifs d'expertise sur le stockage (ou la séquestration ! …) du carbone dans les forêts, et à un degré moindre, dans les cultures ; mais les développements récents dans la maîtrise des modèles de simulation de ces cultures, en particulier à partir de la famille des modèles STICS élaborés par l'INRA, permettent de penser que ce sera pour bientôt.

Toujours à propos du cycle du carbone, le programme Agrotech a aussi permis d'aborder le problème également important de stockage dans les sols. Il a été ainsi possible d'élaborer un modèle de compartimentation du carbone organique des sols cultivés, d'analyser l'effet de la température sur la minéralisation des résidus végétaux et cette même matière organique et d'en déduire l'effet du réchauffement sur les stocks de carbone des sols cultivés (Agronomie Laon, LBI, Science du Sol, Versailles avec les travaux de Sylvie Recous et Jérôme Balesdent) : il est apparu que la réduction de l'ordre de 8% due à l'élévation de la température devrait être pratiquement compensée par l'élévation de productivité prévisible pour 2050 ; ce qui amènerait à conclure que les effets des changements climatiques seraient plus faibles que ceux résultant d'autres modifications des systèmes de production (sous réserve que cette productivité progresse au rythme envisagé…).

Parmi ces modifications, l'une des plus significatives est liée au mode d'utilisation des terres (fig.6), et en particulier l'évolution des prairies. Les conséquences du retournement des prairies et d'une conversion des forêts en terres arables ont pu être chiffrées ; (Agronomie à Clermont et Écophysiologie forestière à Nancy, Science du Sol à Orléans) de même que le stockage du carbone dans la biomasse de la forêt évalué au niveau de 137 tonnes/ha (Écophysiologie forestière à Nancy, Jean-Luc Dupouey). Le bilan net de la séquestration de carbone annuelle par les forêts françaises est estimé à environ 10 millions de tonnes de carbone, soit environ 10% des émissions fossiles. À noter que la tempête de décembre 99 devait libérer, par combustion ou décomposition, de l'ordre de 28 millions de tonnes de carbone, ce qui représente l'équivalent de trois années de cette séquestration. L'utilisation du bois dans les matériaux de construction, prévue à hauteur de 25% des matériaux utilisés par le dispositif réglementaire récent, fait l'objet de travaux à Nancy (équipe de Gérard Nepveu). Par ailleurs, une cartographie permettant l'évaluation des stocks de carbone à l'échelle française a pu être établie (Science du Sol, Dominique Arrouays, Orléans) à la demande de la Mission Interministérielle pour l'Effet de Serre, créée en 1992 (MIES dont fait partie Arthur Riedacker, auparavant en Recherches forestières INRA) : les stocks de car-

Fig.6 Occupations et stocks de carbone des sols (T/ha sur 0 à 30 cm)



D'après Arrouays et alii 1999.

Le programme national de la MIES concernant le secteur agriculture, forêts, produits dérivés

Le secteur "agriculture, forêts" contribue pour 18% au bilan de l'ensemble des gaz à effet de serre sur le territoire français.

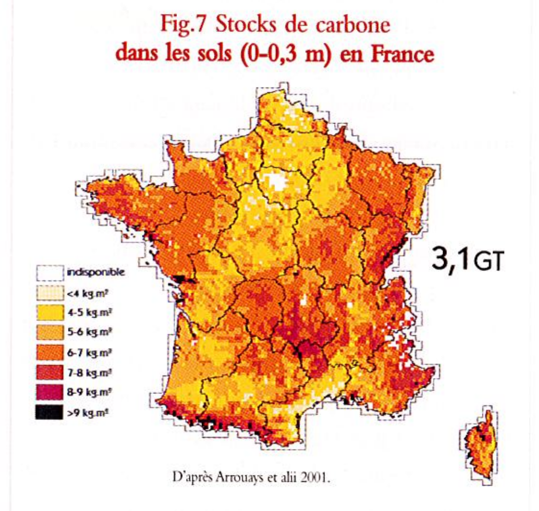
À la différence des autres secteurs pris en considération par ailleurs dans les programmes visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre, l'espace agricole et forestier et les produits qui en dérivent ne constituent pas que des sources de gaz carbonique, de méthane et d'oxyde nitreux. Il comporte aussi des puits où le gaz carbonique est absorbé grâce à la photosynthèse. Dans les espaces cultivés, les prairies et surtout les forêts, considérés comme des sous-ensembles, on peut faire varier et souvent accroître les stocks de carbone : une conversion d'un taillis en futaie permet, à terme, de doubler le stockage moyen de carbone par hectare. Les stocks de carbone peuvent aussi être augmentés par boisement des terres agricoles, en transformant les champs cultivés en prairies ou encore en augmentant les stocks de bois utilisé dans la construction, en substitution à d'autres matériaux.

Les capacités d'accroissement de ces stocks de carbone ne sont cependant pas illimitées. Pour continuer à absorber du carbone et capter de l'énergie solaire dans les biomasses, il faut récolter tout ou partie des biomasses ou des bois produits, dont l'utilisation permet de remplacer des énergies et des matières premières fossiles. L'utilisation de biomatériaux à la place d'autres matériaux à plus fort contenu énergétique et plus polluants lors de leur production et de leur mise en œuvre, permet aussi dans certains cas d'économiser des énergies fossiles et de réduire les émissions de gaz carbonique.

Photo : Bertrand Nicolas

bone sont estimés à environ 3 milliards de tonnes sur les 30 premiers centimètres (fig.7). L'ensemble des résultats obtenus a récemment permis à l'INRA de répondre favorablement à une demande d'expertise

Fig.7 Stocks de carbone dans les sols (0-0,3 m) en France



D'après Arrouays et alii 2001.

collective du ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement [6] auquel collabore Michel Robert, auparavant en Science du Sol INRA, sur le stockage du carbone dans les sols agricoles. Ce travail doit être achevé courant 2002.

- Les autres gaz

En dehors du carbone, deux autres gaz ont déjà été mentionnés, en relation avec les activités agricoles : l'oxyde nitreux (N_2O) et le méthane (CH_4).

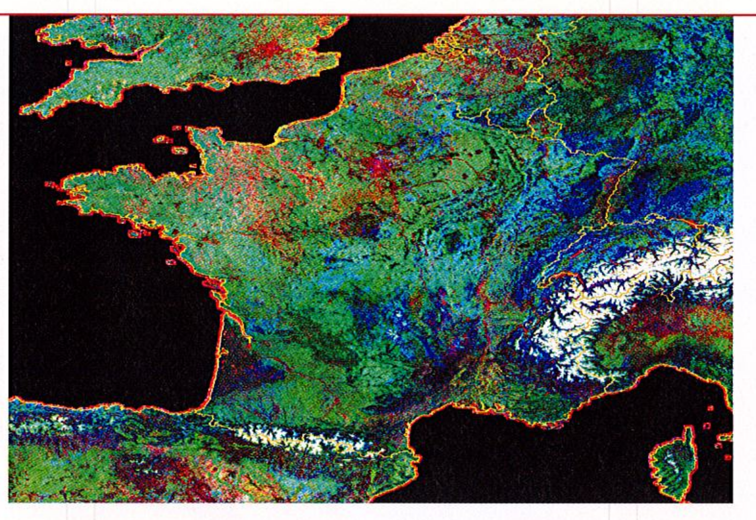
• L'**oxyde nitreux** peu étudié auparavant à l'INRA, a fait l'objet d'un investissement important [7] de 1994 à 1998. Ces travaux, qui ont conjugué des études de modélisation fine sur les mécanismes de production dans les sols équipes de Pierre Renault en Science du Sol, Avignon et de Jean-Claude Germon en Science du Sol, Dijon, et de mise au point de dispositifs de mesures sur le terrain des émissions de N_2O Bioclimatologie, puis Environnement et Grandes Cultures, Grignon pour l'équipe de Pierre Cellier, permettent à l'heure actuelle de progresser vers l'évaluation de ces flux à l'échelle régionale, ou même du territoire français.

• Les résultats obtenus confirment au premier ordre la relation linéaire avec les apports d'engrais azotés ; ce qui amène les pouvoirs publics à envisager d'agir sur les émissions de gaz par le biais indirect de la taxation prévue dans la loi sur l'eau. Au-delà de ce facteur prédominant, les travaux ont également mis en évidence des variations locales liées au type de sol et à la disponibilité en azote ; ce qui conduit à formuler des recommandations pratiques à l'usage des agriculteurs.

• Quant au **méthane**, c'est essentiellement l'émission de ce gaz par les ruminants qui a fait l'objet d'une analyse des processus, d'une quantification et d'une modélisation permettant d'établir des bilans spatialisés, et enfin d'évaluer les possibilités de réduction Chaire de Zootechnie INA-PG du professeur Daniel Sauvant, unité de recherches sur les Herbivores, Clermont avec les travaux de Jean-Pierre Jouany.

[6] À la demande du MATE aujourd'hui MEDD, qui se trouve engagé dans les négociations internationales pour la mise en œuvre du protocole de Kyoto, l'INRA conduit sa première expertise scientifique collective sur la capacité des sols agricoles à séquestrer du carbone. Ce travail se conclura par un rapport qui sera remis au commanditaire en octobre 2002. La présentation de la synthèse du rapport donnera lieu à une conférence de presse et à un ouvrage de vulgarisation destiné à un public élargi.

[7] En grande partie soutenu par le programme Agriges, mis en place par le ministère de l'Environnement, en liaison avec la MIES, le ministère de l'Agriculture et de la Pêche, l'ADEME et l'INRA.



La France vue selon une synthèse d'images sur l'année 2000 par le capteur VEGETATION sur SPOT 4. Traitement effectué par C. Dibella à l'unité Climat, Sol et Environnement, Avignon ©SPOT image.
Parmi les outils permettant de caractériser l'évolution temporelle des écosystèmes, l'**observation spatiale** à partir des systèmes satellitaires d'observation de la terre devrait constituer un apport significatif en mobilisant les compétences de l'INRA dans le domaine de la **télédétection**. (voir p.16).

En revanche, les échanges de méthane à partir des sols et des cultures n'ont pas encore fait l'objet de recherches conséquentes, parce que leur importance au niveau du territoire français apparaît faible, contrairement aux zones tropicales où les rizières jouent un grand rôle ; ce qui explique que les travaux aient été essentiellement réalisés par des spécialistes de l'IRD. Il paraît cependant intéressant d'aborder le problème des émissions de méthane par des surfaces inondées ou des lagunes programme à l'étude en Science du Sol à Dijon, où existe déjà une expertise bibliographique sur le bilan du méthane.

Pour que le panorama soit (presque) complet, mentionnons également, en plus du projet européen Greengrass qui se propose d'établir un inventaire de la contribution des prairies au bilan de gaz à effet de serre à l'échelle européenne :

• d'une part, les travaux sur l'émission de gaz à effet de serre par les bâtiments d'élevage, et plus largement à partir de l'épandage de déjections animales Science du Sol et Agronomie, Rennes, Paul Robin

• d'autre part, les études sur la régulation des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole département Économie et Sociologie rurales, Pierre-Alain Jayet à Grignon : les travaux ont mis en évidence le potentiel important de réduction de ces gaz par le boisement des terres mises en jachère obligatoire (sous réserve que ce moyen d'action soit reconnu par les accords internationaux) ; ils ont également montré que les politiques de taxation, applicables suivant le fonctionnement habituel de la PAC, amèneraient, compte tenu de la difficulté de taxer directement les émissions, à agir au second rang en considérant les facteurs supposés en être responsables comme les cultures et les engrais pour le N_2O, les aliments et les animaux pour le CH_4.

Par ailleurs, l'incitation à stocker du carbone aurait des conséquences importantes en termes redistributifs en donnant des crédits à ceux qui ont des terres, parce qu'ils peuvent ainsi compenser une partie de leurs émissions grâce au stockage de carbone, par rapport à ceux qui en ont moins ou de moins disponibles.

• Enfin, le programme du GIS "Porcherie Verte" a été lancé en 2001 avec 17 partenaires de la filière porcine, (recherches INRA/CEMAGREF/AGRO/professionnels/structures politiques/organismes environnementaux/Instituts techniques) afin de mettre au point des systèmes d'élevage intégré respectant l'environnement et préservant l'équilibre économique des exploitations.

Le diagnostic actuel : le changement climatique est-il déjà en cours ?

En résumé, on peut admettre que l'investissement de l'INRA sur les impacts du changement climatique a été significatif à la fin des années 80 (environ une dizaine de chercheurs), et qu'il s'est ensuite concentré sur quelques individualités, fortement sollicitées à titre d'expert comme Richard Delécolle à Avignon et Jean-François Soussana à Clermont-Ferrand, qui ont participé respectivement au deuxième et au troisième rapports du GIEC ou Jean-Luc Dupouey à Nancy et Denis Loustau à Bordeaux pour les recherches forestières.

Dans le même temps, la contribution au thème "gaz à effet de serre" augmentait significativement pour concerner l'équivalent d'une vingtaine de chercheurs, ce qui est à peu près le niveau actuel.

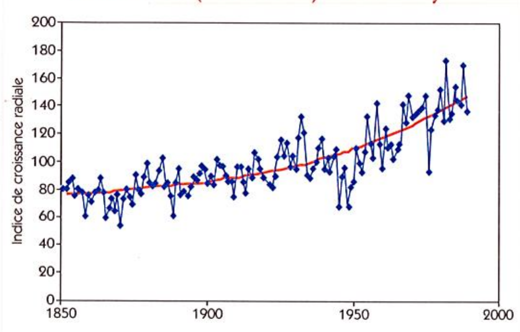
Le ralentissement, au mieux la stagnation, de l'engagement sur le changement climatique, pourtant de plus en plus présent dans les préoccupations sur l'environnement, peut paraître étonnant. De notre point de vue, il apparaît toujours *a posteriori* justifié, en tout cas d'un point de vue scientifique.

Tant sur le plan des effets du doublement du CO_2 que de l'impact de scénarios sur le fonctionnement des cultures évalué par les modèles de simulation, les travaux de la période 85-95 avaient permis d'identifier "le premier ordre" des conséquences prévisibles. Si les scénarios climatiques pouvaient donner des hypothèses de travail sérieuses sur le plan de l'augmentation des températures, il n'en était pas de même sur la pluviométrie, et tout travail incorporant le bilan hydrique (ce qui est quand même hautement souhaitable) tenait plus de la spéculation pure que de l'hypothèse vraisemblable.

Par ailleurs, l'horizon étudié (fin du siècle, en gros 2070-2100) était suffisamment lointain pour qu'on puisse penser avoir le temps de réagir, en comptant sur l'adaptation des systèmes de culture (de l'ordre de quelques années pour les grandes cultures, si l'on

en juge d'après les adaptations aux données économiques de la PAC, peut-être dix ou vingt ans pour les arbres fruitiers… mais cela laisse un peu de temps). Seul le bastion des forestiers pouvait résister à cette analyse, sachant que, dans leur domaine et compte tenu du temps de croissance des arbres, la durée de l'adaptation peut bien atteindre une cinquantaine d'années. Cela explique pourquoi ils étaient les premiers à incorporer spécifiquement l'hypothèse du changement climatique dans leurs prospectives au sujet de la filière bois. Et ceci d'autant plus que la dendrochronologie permettait, dans le même temps, d'établir de manière de plus en plus convaincante au fil du temps (et ceci a été confirmé récemment par l'analyse de peuplements d'âges variés dans les mêmes contextes) que la croissance des peuplements forestiers avait augmenté, depuis le début du siècle, d'environ 30% ; ce qui est absolument énorme, et bouleverse les perspectives de la filière dès maintenant (fig.8). Bien sûr, il n'est pas encore possible de savoir, entre l'augmentation du CO_2 et le réchauffement climatique d'une part, l'élévation des dépôts atmosphériques d'azote dans les précipitations naturelles pouvant agir comme fertilisant naturel d'autre part, quels sont les facteurs responsables, mais la constatation d'une augmentation de la productivité des formations boisées (par ailleurs peut-être responsable, en tout ou partie, du fameux "puits manquant" de carbone) amène à prendre très sérieusement en compte le changement climatique et à envisager l'hypothèse que ses effets se font déjà sentir.

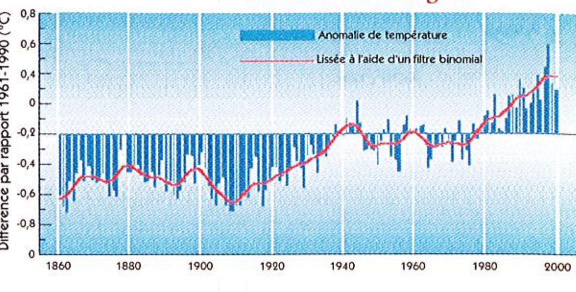
Fig.8 Hêtre dans le Nord-Est de la France (1025 arbres) INRA Nancy



Une inconnue importante réside dans l'effet possible de la sécheresse et de ses conséquences sur le bilan hydrique qui pourraient être déterminantes sur l'évolution de la répartition géographique des espèces et de leur productivité en général ; sans compter l'effet sur la biodiversité et les risques tels que les incendies de forêt équipe de Jean-Charles Valette, Avignon.

Au fur et à mesure que les années 90 se déroulaient et que se confirmaient les observations sur une décennie particulièrement chaude (les années les plus chaudes se succèdent et battent peu à peu les records, comme un athlète dopé au CO_2 ou aux gaz à effet de serre en général), le scepticisme diminuait. Bien sûr, les scénarios restent des scénarios, dont tout scientifique spécialiste peut énumérer les faiblesses, en particulier au niveau des interactions telles que surface/atmosphère, nuages/aérosols…). Mais globalement, l'effet de serre existe, et même si on ne peut pas dire que le réchauffement est établi par cette dernière décennie (il faut toujours garder en tête la forte variabilité naturelle, y compris à l'échelle de décennies telles que 70-80, plus froide et plus humide au niveau français, par exemple), on peut au moins faire la constatation que les modèles ne sont pas démentis par les observations. En ce début de siècle, les données s'accumulent : études de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), montrant un réchauffement significatif depuis le début du siècle (fig.9) ; études récentes de Météo France montrant la même chose au niveau français (fig.10), et rapports du GIEC de plus en plus précis et de plus en plus crédibles, au moins au niveau de la communauté scientifique. Bien sûr, la gamme d'incertitude reste forte (de 1,5 à 6°C pour la température moyenne de 2070), mais, en même temps, elle a augmenté en crédibilité.

Fig.9 Variations de température de l'ensemble du globe



Par ailleurs, les rapports du GIEC ont peu à peu élargi la gamme des prospectives portant sur les impacts, non seulement sur l'agriculture et la forêt, mais aussi sur l'élevage, la santé animale, la santé humaine, l'énergie, les transports et bien sûr l'économie. En termes de domaines disciplinaires, ce ne sont plus seulement l'agronomie ou les forêts (avec les départements correspondants) qui sont concernés, mais aussi la santé des plantes ou des animaux, la génétique, l'élevage, l'hydrologie, l'économie…

D'où l'idée, fortement sollicitée par le ministère de la Recherche (qui a organisé un colloque national le

Fig.10a Cartographie de la tendance séculaire de la température maximale moyenne annuelle (tendances pour la période 1901-2000)

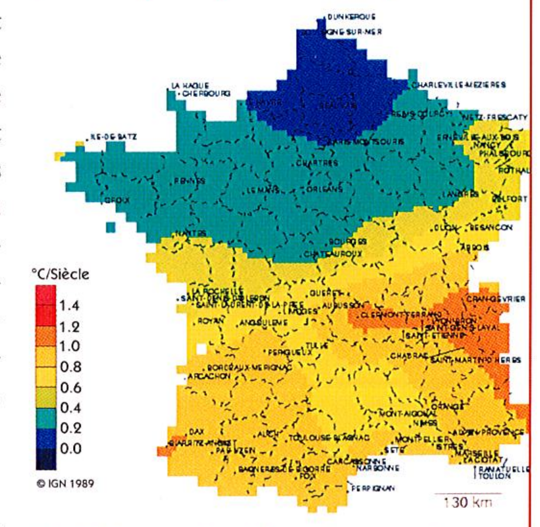
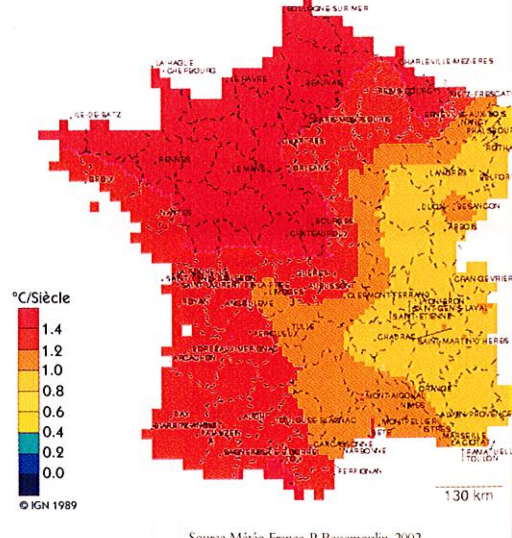


Fig.10b Cartographie de la tendance séculaire de la température minimale moyenne annuelle (tendances pour la période 1901-2000)



Source Météo France, P. Bessemoulin, 2002.

29 mai 2001 sur le sujet) de lancer à l'intérieur de l'INRA un programme sur cet aspect des impacts du changement climatique, venant compléter à nouveau les travaux portant sur l'effet de serre proprement dit. Le changement climatique n'est plus une éventualité parmi d'autres résultant d'un scénario de science-fiction pour la fin du XXIe siècle, c'est une réalité qu'il faut se préparer à affronter dès maintenant.

Vers un programme de recherches transversal à l'INRA

La réflexion a porté en premier lieu, sur le domaine de la production agricole et forestière, avec les points suivants :

Analyser les évolutions à la lumière du passé récent

Comme nous l'avons noté plus haut, le changement climatique est peut-être déjà en cours. Sans se prononcer clairement sur ce point, qui peut encore faire l'objet de nombreuses controverses, à tout le moins, il est maintenant possible d'affirmer que la dernière décennie s'est caractérisée par un climat différent de celui des années 70 (fig.11), qui s'est traduit par des conséquences notables, par exemple en termes de phénologie des arbres fruitiers (fig.12) Nadine Brisson, CSE, Avignon. Il en résulte des interrogations sur les conséquences des hivers doux sur la mise à fleur de certaines espèces comme l'abricotier Jean-Michel Legave, GAFL, Avignon. On retrouve le même phénomène pour la vigne (avancement de la date de véraison et donc des vendanges, étudié sur la variété syrah avec l'élévation de la température) Éric Lebon, LEPSE, Montpellier. Ces observations ont conduit à élaborer une base de données phénologiques associant l'INRA et les organismes professionnels pour reconstituer les séries anciennes, les actualiser et les suivre Marjorie Domergue, Agroclim, Avignon. Il en résulte également un allongement de la durée de végétation pour les forêts. Sans abandonner totalement l'effort de prévision des scénarios du doublement du gaz carbonique dans l'atmosphère pour la fin du siècle, revisiter le passé récent doit permettre, en particulier à partir des acquis de modélisation qui lui seront associés, de préfigurer l'évolution prévisible pour un horizon plus proche, par exemple 2025.

Fig.11

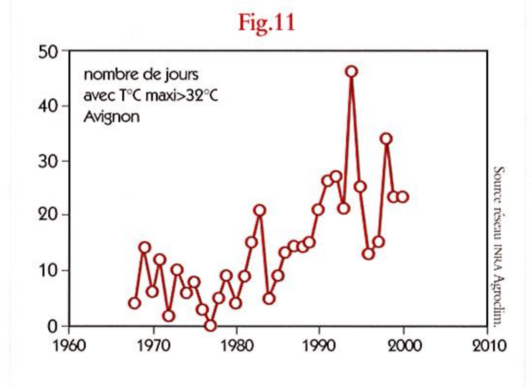
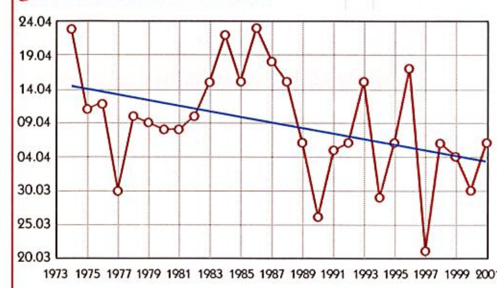


Fig.12 CTIFL Balandran : date de floraison du pommier golden delicious - stade F1

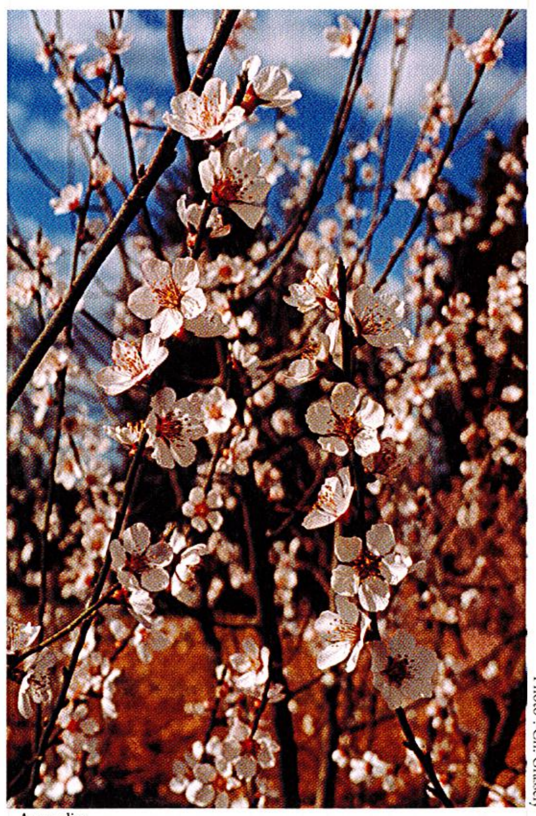


Intensifier les échanges avec les modélisateurs du climat

Les liens avec les laboratoires de modélisation du climat existent déjà, comme nous l'avons indiqué, aussi bien pour caractériser le fonctionnement des surfaces naturelles en entrée des modèles que pour disposer en sortie de scénarios climatiques adaptés aux besoins de nos travaux. Ces liens doivent être renforcés dans ces deux directions :

- à propos de l'échelle des modèles

Les progrès effectués ces dernières années pour ces modèles amènent à améliorer nettement la définition géographique des grilles d'entrée utilisées. D'une échelle globale assez large qui reste encore grossière, la modélisation est en train de passer à l'échelle continentale qui se rapproche des compétences disponibles à l'INRA. Par exemple, l'Europe, actuellement caractérisée par une végétation seulement représentée par quelques grands biomes, devrait incorporer la prise en compte de l'agriculture (qui occupe jusqu'à la moitié du territoire) et des


Photo : Ch. Grasely

Amandier.

forêts exploitées. Des travaux ont commencé pour incorporer des modèles de simulation tels que STICS pour les cultures et PASIM pour les prairies, ou les modèles de fonctionnement des forêts mis au point à l'INRA, pour mieux représenter les processus réels.

- à propos des scénarios d'évolution du climat : cycle de l'eau, variations géographiques, périodes de transition

Par rapport aux scénarios climatiques utilisés jusqu'à maintenant, et surtout fondés sur les valeurs moyennes de réchauffement, il apparaît nécessaire que les spécialistes puissent aller, autant que faire se peut, vers les prévisions de valeurs-seuils, par exemple pour le gel ou l'échaudage, en termes d'extrêmes, vitesse du vent en cas de tempête, ainsi que de la variabilité associée au changement climatique. De même, l'amélioration de la qualité des prévisions possibles sur les éléments du bilan hydrique (avec la pluviométrie en premier lieu, bien sûr) reste une demande constante de notre part. La distribution géographique, liée à une échelle spatiale améliorée (on est en train de passer à une résolution de l'ordre de 50 km par rapport aux 250 km disponibles jusqu'alors, mais il faut, bien sûr, établir la validité de cette progression), est également un objet de discussions communes. Enfin, le recentrage vers la période actuelle et la prévision de ce que pourrait être l'horizon 2025 amène à souhaiter que les modélisateurs se penchent de manière plus affirmée sur l'étude de ce qu'ils appellent les "scénarios de transition" conduisant aux prévisions pour la fin du siècle. Il faut souligner que des approches expérimentales seront encore nécessaires pour vérifier les conséquences des scénarios et ce, particulièrement pour les systèmes complexes (forêts, prairies) qui demeurent difficiles à modéliser du fait de leur complexité.

Élaborer des scénarios en termes de systèmes de culture, d'élevage et de production

Deux lignes directrices sont à retenir pour aller vers la préfiguration de ce que pourraient être les caractéristiques des années à venir.

- d'une part, passer du stade d'analyse de modifications envisageables ("*que se passera-t-il pour la production actuelle à tel endroit*") au stade plus élaboré d'interrogation sur l'adaptation des systèmes à la nouvelle donne ("*que devra-t-on envisager à tel endroit dans les conditions d'un climat modifié*").

Dans le cas des cultures, par exemple, cela devra amener à concevoir de nouveaux systèmes adaptés, en termes de choix de spéculation, de variétés, de techniques culturales en tenant compte des adventices… Sans aller jusqu'aux plaisanteries faciles du type de la culture du bananier, faut-il envisager de faire remonter vers le nord certaines productions, et de s'inspirer au sud de cultures plutôt réservées à l'Espagne, sinon au Maghreb (c'est peut-être irréaliste, mais il est possible de se poser la question). L'évolution vers un climat plus chaud pourrait également favoriser le développement de certains ravageurs (ou d'ailleurs en éliminer certains autres) ou des maladies cryptogamiques. Il en va de même pour l'élevage, qui aura à prendre en compte aussi bien l'adaptation de l'animal aux conditions climatiques modifiées que celle de la ressource fourragère et du fonctionnement des sols, mais aussi à intégrer l'éventualité de maladies ou d'épidémies actuellement limitées aux climats chauds.

Enfin, ces travaux devraient dépasser la seule analyse de la production en **quantité** abordée jusqu'à maintenant pour aborder la notion de **qualité**. Par exemple, la qualité des céréales peut être modifiée assez fortement à la fois par le réchauffement et par l'augmentation du CO_2 atmosphérique. On pense également à la vigne, bien sûr, avec la notion de terroir, où l'ajustement étroit aux conditions pédoclimatiques peut modifier significativement… à voir… les données de l'équation, et conduire à suggérer, sinon des révisions déchirantes, du moins une adaptation des techniques culturales ou des procédés œnologiques.

En complément, ces travaux devraient également prendre en compte les **sorties environnementales**, à la fois parce qu'elles conditionnent maintenant la production, que ce soit pour les cultures, la forêt ou l'élevage, et aussi parce qu'elles conduiront à aborder le problème de l'interaction entre les bilans de gaz à effet de serre et le changement climatique. Ce point a déjà été abordé par le biais de précédents travaux (par ex., l'influence d'une augmentation de la température du sol sur le fonctionnement microbien et le devenir du carbone dans les sols), mais il nécessitera une analyse beaucoup plus systématique, qui pourrait être l'un des axes marquants du programme à venir.

Dans le même esprit, le recours aux connaissances de **l'écophysiologie** devrait continuer à être l'un des points marquants de ce programme : au-delà des questions déjà posées par le fonctionnement des couverts végétaux dans l'hypothèse d'un doublement du CO_2, l'impact des conséquences d'une augmentation moins spectaculaire, mais peut-être déjà significative, de l'ordre d'une fois et demie le CO_2 actuel (pour l'horizon 2025) sera à évaluer, dans le même esprit que les questions posées aux

climatologues sur les scénarios de transition. Qu'en sera-t-il au niveau du déterminisme de la résistance stomatique des végétaux, ou même de la définition de l'évapotranspiration potentielle (ETP) si la transpiration est réduite ? Autant de points qui devraient être abordés…

Étendre à d'autres disciplines

• Au-delà de ces évolutions, il est temps maintenant d'élargir le champ de ces recherches, essentiellement menées par les départements "Environnement et Agronomie" et "Forêts et milieux naturels", en prenant en compte également les problèmes de santé des plantes : maladies cryptogamiques voir les résultats de l'AIP "Ecopath" qui vient de se terminer, sous la responsabilité de Laurent Huber et développement des populations d'insectes comme l'extension constatée ces dernières années en latitude et en altitude de la processionnaire du pin travaux de Guy Demolin, Avignon repris par Alain Roques, Orléans et de Pierre Zagatti, Versailles et ceux ayant trait aux adventices. De même, il est temps d'aborder les problèmes de choix génétiques de variétés permettant de s'adapter à la nouvelle donne climatique.

• Parmi les outils permettant de caractériser l'évolution temporelle des écosystèmes, l'**observation spatiale** à partir des systèmes satellitaires d'observation de la terre devrait constituer un apport significatif en mobilisant les compétences de l'INRA dans le domaine de la **télédétection**.

• Enfin, la réflexion en cours doit résolument prolonger cette ouverture pluridisciplinaire en s'ouvrant vers un champ d'investigation analytique en particulier à l'élevage et à l'épidémiologie animale. Des épisodes récents d'apparition d'épidémies telles que la *"blue tongue"* des ovins en Corse et la fièvre du Nil chez les chevaux de Camargue amènent à s'interroger sur l'implication éventuelle du changement climatique, sachant que beaucoup d'autres facteurs peuvent être impliqués, en particulier l'intensification des échanges Jacques Barnouin, Épidémiologie animale, Clermont-Ferrand, cf l'AIP "Epiemerge" qui débute. Il faut également étendre la réflexion à l'écologie des écosystèmes continentaux et aquatiques ainsi qu'aux impacts sur l'alimentation humaine [8]. Par ailleurs, elle doit s'enrichir de la prise en compte des régulations économiques et des interactions sociales.

Conclusion

Ces travaux sont à développer à la fois dans des champs disciplinaires très variés et au croisement de ces disciplines. Ils nécessitent donc une animation scientifique et des échanges constants, ce d'autant qu'ils font appel à une grande complexité d'analyse et qu'ils mettent en jeu des variables très nombreuses et à une échelle globale. Cela dans un contexte social pressant, ponctué d'événements, tempêtes, inondations, fortement médiatisés et qui ont de grandes conséquences aussi bien pour les milieux urbains qu'agricoles. Ils appellent ainsi des réponses urgentes que l'on peut être tenté de vouloir simplistes. D'où ce programme coordonné, qui devra s'appuyer sur les éléments évoqués, et répondre à une demande forte et croissante d'**éclairage de la décision publique pour :**

• anticiper les conséquences majeures au niveau mondial, en termes de sécurité des ressources et de risques naturels, mais aussi de sécurité alimentaire et de marchés

• préfigurer des scénarios

• proposer et évaluer des politiques adaptatives

• enfin participer à la prévention : amélioration des bilans d'émission, contribution à la définition des positions dans les négociations, alimentation du débat public.

Pour la **problématique scientifique**, dont la formulation requiert un effort collectif de longue durée, le travail d'animation devrait s'appuyer sur quatre grands axes :

• étudier les couplages entre climat et cycles biogéochimiques, prenant en compte les rétroactions entre le fonctionnement de l'écosystème, leur biodiversité et l'évolution du climat

• établir les liens entre variabilité du climat, dynamiques écologiques et fonctionnement des systèmes cultivés

• définir les leviers de l'action : anticipations, mesures de prévention, stratégies adaptatives

• élaborer des méthodes et des outils pour diagnostiquer, simuler, prévoir et aider à la décision.

Le programme de travail ainsi défini pour l'INRA doit manifestement **se situer dans un mouvement collectif** en tenant compte des structures existantes (en particulier programmes inter-organismes, actions "Gestion des impacts du changement climatique" du ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement…) (GICC) à l'échelle française et internationale (en y incluant bien sûr l'échelon européen).

Il a été décidé, à cet effet, de mettre en place à l'INRA une mission spécialisée pour :

• établir des liens avec les différentes communautés scientifiques et participer à l'animation de leur réflexion

• contribuer au développement des outils : bases de données, modèles, méthodes de simulation

[8] Des travaux récents effectués à Thonon en Hydrobiologie lacustre, ont mis en évidence un réchauffement des eaux du Léman avec une occurrence plus forte de situations à hivers doux favorisant le développement précoce du plancton au printemps. D'après la thèse "Diagnostic sur l'évolution de l'état de santé écologique du Léman par l'analyse des séries chronologiques du phytoplancton" par Orlane Anneville, 2001, 307 p.



Râdhâ fuyant l'orage et se réfugiant auprès de Krishna. Miniature Ragini - Ragni Sita Malar. Kangra, 18e siècle. Orbis pictus vol.6, miniatures indiennes. Éditions Payot, Lausanne, 1950. Avec l'aimable autorisation de Jacques Scherrer.

• constituer une interface externe avec la recherche et les agences d'objectifs
• appuyer le montage de projets aux niveaux interne (transversalités) et externe (contribution à des programmes nationaux et internationaux).
Cette mission s'appuiera localement sur l'unité Agroclim à Avignon qui gère le réseau climatologique de l'INRA et la base de données qui lui est associée.

Une observation, pour terminer : la réflexion que nous avons présentée **conduit à renoncer à l'hypothèse de stabilité du climat**. Or, celle-ci est le plus souvent implicite dans nos travaux, que ce soit au niveau des références expérimentales, des dispositifs d'observation environnementale ou de la modélisation. Prendre conscience de la réalité maintenant plausible du changement climatique conduit à reconsidérer les dispositifs d'acquisition de données, ainsi que les outils d'aide à la décision et d'optimisation. On ne connaît plus la distribution des variables, on ne sait donc plus estimer des fréquences permettant d'évaluer les risques. Par ailleurs, il va devenir extrêmement difficile de séparer les effets attribuables à différentes évolutions ou dynamiques. Autant de questions complexes qu'il va falloir se donner les moyens d'aborder.

Bernard Seguin,
Mission "Changement climatique et effet de serre"
Pierre Stengel,
Directeur scientifique
"Environnement, forêt et agriculture".

Les travaux INRA sur l'effet de serre

Généralités : principe de précaution, réglementations, économie échelle Europe/internationale

• Effet de serre d'origine agricole : quels outils pour le limiter ?
À Kyoto, en 1997, la France s'est engagée à stabiliser à l'horizon 2008-2012 ses émissions de gaz à effet de serre à leur niveau de 1990. Les conséquences qu'auraient des mesures économiques (primes et taxes) visant à réduire les émissions produites par le secteur agricole ont été étudiées. Cette analyse se fonde sur la modélisation du choix des activités agricoles par les exploitants. La mise en œuvre pratique de ces mesures serait délicate, en raison de problèmes techniques et des inégalités qu'elles pourraient induire entre exploitations agricoles.
"Approche économique de l'effet de serre d'origine agricole" Pierre-Alain Jayet, Stéphane De Cara, Économie et Sociologie rurales, Versailles-Grignon, INRA *Sciences Sociales*, n°3, octobre 99. *Presse Info*, février 2000 ; INRA *mensuel* n°104, mars-avril 2000.

• Le principe de précaution est-il économiquement acceptable ? Politiques de précaution et changement global.
Nicolas Treich, UMR Économie de l'Environnement et des Ressources naturelles (Leerna) Toulouse. INRA *Sciences sociales* n°6/00, juillet 2001.

Émission de gaz par l'activité agricole : végétaux et animaux

• Culture de colza, dégagements gazeux et environnement.
Ghislain Gosse, Bioclimatologie, Thiverval-Grignon. INRA *mensuel* n°86, décembre 1995.

• Pollution atmosphérique : le cas de l'azote dans les sols cultivés.
Le devenir de l'azote dans les sols a fait l'objet de nombreuses études, tant pour améliorer la conduite de la fertilisation des cultures que pour tenter de maîtriser les pollutions des nappes phréatiques par le nitrate. Par contre, les émissions d'azote sous forme gazeuse dans l'atmosphère, elles-mêmes source de pollutions, ont très peu été étudiées. Des chercheurs de l'INRA (Bioclimatologie, Versailles-Grignon ; Jean-Claude Germon, Microbiologie des sols Dijon ; Pierre Renault, Science du sol, Avignon ; Agronomie, Rennes) ont montré que ces émissions, protoxyde d'azote, ammoniac et oxydes d'azote, peuvent représenter des quantités importantes et ont précisé les mécanismes de leur production.
Presse Info, octobre 1998.

• Les émissions de méthane des ruminants
Le méthane (CH_4) est un des gaz responsables de l'effet de serre ; il y contribue à hauteur de 15% environ. Chez les herbivores, la digestion microbienne, qui leur permet d'utiliser les fourrages, conduit à la production de ce gaz. La contribution des herbivores à la production mondiale de méthane serait d'environ 16%, soit une contribution de l'ordre de 2,4% à l'effet de serre. Les recherches menées à l'INRA (Nutrition des Herbivores, Clermont-Theix ; Croissance et Métabolismes, Clermont-Theix ; Microbiologie, Clermont-Theix, Nutrition et Alimentation de l'INA-PG, Paris) ont permis de comprendre les mécanismes biochimiques de la formation du méthane et de quantifier les émissions journalières et annuelles des herbivores en France. Celles-ci varient selon le type d'animal, son alimentation, son niveau de production. Ces références permettent de discuter des moyens pour tenter de réduire cette pollution. *Presse Info*, mai 1998.

• Réduction des émissions de méthane par les ruminants
Coopération INRA-AgResearch (Nouvelle-Zélande). Gérard Fonty, Microbiologie des Écosystèmes digestifs, Clermont-Theix. *L'Écho des Puys*, lettre du centre de Clermont-Theix n°26 juin 2000.

• Pollutions d'origine agricole : l'intérêt de l'élevage des porcs sur litière
La pollution des eaux et de l'air induite par l'élevage porcin peut être significativement réduite en adoptant l'élevage sur litière. C'est la conclusion de travaux menés de 1996 à 1999 par des chercheurs de l'INRA (Paul Robin, UMR INRA-ENSAR (École supérieure d'agronomie de Rennes) Sol-Agronomie-Spatialisation, Environnement et Agronomie, Rennes) avec le soutien du Comité Bretagne Eau Pure et en collaboration avec des industriels. Le passage de l'élevage sur caillebotis, habituellement pratiqué, à l'élevage sur litière ne réduit pas les performances zootechniques des élevages. Elle nécessite une adaptation des bâtiments pour tenir compte de l'humidité et de la chaleur dégagées par la litière. À ce jour, 10 à 15% des éleveurs ont adopté l'élevage sur litière. *Presse Info*, juin-juillet 2001.

• "*Porcherie Verte*"
un programme de recherches pour préserver l'environnement des zones de production, INRA *mensuel* n°111, sept-octobre 2001.

Pollution atmosphérique

D'autres travaux de l'INRA sur la pollution atmosphérique *sensu stricto* concernent indirectement l'effet de serre :
• décelée par des indicateurs végétaux, notamment le tabac par Jean-Pierre Garrec à Nancy
• détection de l'ozone de la basse atmosphère par Jean-François Castell à Grignon.
...

• Le projet européen de recherche "Greengrass"
financé par la Commission Européenne pour 3 ans (2002-2004) (18 équipes de recherche dans 8 pays impliqués : Royaume-Uni, Danemark, Irlande, Suisse, Hongrie, Pays-Bas, France, Italie dont 5 centres INRA) est coordonné par Jean-François Soussana (équipe FGEP-unité d'Agronomie).
Ce programme a pour objectif d'établir un inventaire détaillé de la contribution nette des prairies européennes aux flux de trois principaux gaz à effet de serre (CO_2, CH_4, N_2O) et d'évaluer les possibilités de réduction de ces émissions nettes par des adaptations des systèmes d'élevage.
La contribution nette des écosystèmes prairiaux au réchauffement global (en équivalent CO_2) n'est pas connue à l'échelle européenne, l'essentiel des travaux ayant porté jusqu'à présent sur les écosystèmes forestiers. Pourtant, les prairies permanentes représentent des surfaces importantes, en moyenne 36% de la surface agricole européenne, et plus de 60% dans les îles britanniques ou en zones de montagnes. Une approche intégrée, permettant de quantifier l'ensemble des échanges avec l'atmosphère des trois gaz à effet de serre (CO_2, CH_4, N_2O), est donc nécessaire.
Le 1er objectif de Greengrass est de réduire les incertitudes concernant les estimations des flux de CO_2, CH_4, N_2O de prairies soumises à différentes gestions et de déterminer la résultante de ces flux en terme de pouvoir de réchauffement global. Afin de couvrir l'ensemble des situations pédo-climatiques européennes, 8 sites expérimentaux ont été retenus sur un axe ouest-est et un gradient sud-nord : Italie, France (Laqueuille – Massif central) Écosse, Irlande, Pays-Bas, Suisse, Danemark et Hongrie.
Le protocole expérimental propose de mesurer sur chacun des sites retenus, correspondant à des prairies permanentes de moyenne montagne pâturées par des bovins allaitants, l'ensemble des échanges nets de CO_2, CH_4 et N_2O à l'échelle de grandes parcelles. Les échanges nets de CO_2, CH_4 et N_2O, pour différentes conditions pédo-climatiques et différents facteurs de gestion, seront ensuite simulés et modélisés à l'échelle de la ferme, de la région agricole jusqu'à l'échelle du continent européen.
Le second objectif du projet sera de construire et d'évaluer des scénarii

agricoles de réduction des émissions de ces trois gaz à effet de serre. Les résultats du projet permettront d'affiner les estimations des facteurs d'émission de gaz à effet de serre utilisés dans les inventaires nationaux ; la méthodologie correspondante sera mise à disposition des organismes concernés : Mission Interministérielle Effet de Serre, Groupe de Travail sur le Changement Climatique des Nations Unies (UNFCCC), Agences gouvernementales chargées d'appliquer les politiques environnementales post-Kyoto (d'après *l'Écho des Puys* n°45, mars 2002).

• *Biomasse*
Un ensemble de travaux de l'INRA dans les années 70/80 ont concerné la biomasse faisant appel à des recherches de microbiologie, d'agronomie et de sciences du sol.

• *Biocarburants* :
INRA mensuel n°36, 46, 52.
Les travaux sur l'utilisation non-agricole des végétaux sont coordonnés par J.C. Sourie (Économie et Sociologie rurales, Grignon).

• *L'agriculture biologique*
Il faut voir également "L'agriculture biologique et l'INRA. Vers un programme de recherche" *INRA mensuel*, tiré à part n°104, mars-avril 2000, 26 pages.

Capture de CO_2 : forêt, sol

• *La forêt, piège à gaz carbonique ?*
La forêt est un stock de carbone sous forme de bois, qui provient de l'assimilation par les arbres du gaz carbonique (CO_2) de l'air. Une partie de ce stock est souterrain, non seulement dans les racines, mais aussi dans le sol, sous forme de matière organique. Si le stock augmente, la forêt effectue donc un prélèvement net de CO_2 dans l'atmosphère. Des chercheurs de l'INRA (Jean-Luc Dupouey, Écophysiologie forestière, Phythoécologie ; André Granier, Bioclimatologie - Écophysiologie Forêts et milieux naturels, Nancy ; Claude Nys, Écosystèmes forestiers : microbiologie, pathologie et biogéochimie, Forêts et milieux naturels, Cycles biogéochimiques, Nancy) ont pu mesurer la quantité de CO_2 capturée chaque année par une jeune forêt en croissance et ont calculé le stockage de carbone dans la forêt française entre 1980 et 1990. La forêt peut ainsi contribuer à limiter la teneur de l'atmosphère en CO_2. *Presse info*, novembre 2000.

• *L'agroforesterie*
Daniel Auclair "La gestion durable des forêts : contribution de la recherche" *INRA mensuel*, les dossiers n°12, automne 1996, p. 84-88
- Christian Dupraz : Expérimentation d'agroforesterie en Europe, INRA Montpellier, laboratoire d'Écophysiologie des Plantes sous stress environnementaux.

• *Les incendies de forêt*
"Prévenir les incendies de forêt", Yves Birot, Jean-Charles Valette, Bernard Hubert. *INRA mensuel*, les Dossiers "La forêt et le bois. Recherches" n°5, 1991.

Effet du CO_2 sur l'écophysiologie végétale et impact des changements climatiques sur l'agriculture

• *Enrichissement en gaz carbonique et production du maïs.*
Françoise Ruget, Olivier Bethenod, Laurette Combe, Bioclimatologie, Grignon. *INRA mensuel* n°74, mars 1994.

• *Changement climatique : quels impacts sur la prairie et l'élevage ?*
La teneur de l'atmosphère en gaz carbonique (CO_2) a augmenté de 30% dans les 100 dernières années, et pourrait encore doubler durant le siècle à venir. Parmi les gaz à effet de serre qui contribuent au réchauffement climatique observé depuis quelques années, le CO_2 joue un rôle particulier : il est également la matière première nécessaire à la croissance des végétaux. C'est à partir de ce gaz que les plantes fabriquent leurs tissus, grâce à la photosynthèse. Une équipe de chercheurs de l'INRA (Jean-François Soussana, Agronomie, Environnement et Agronomie, Clermont-Theix) étudie l'impact de l'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère sur les prairies et l'élevage du Massif Central. *Presse info*, novembre 2000.

• *Changement climatique : quels impacts sur la forêt ?*
Une forêt implantée aujourd'hui parviendra à maturité pour être exploitée dans 50 à 150 ans selon les espèces. Or la teneur de l'atmosphère en gaz carbonique (CO_2) pourrait doubler dans le siècle à venir, la température pourrait augmenter de 2 à 4 °C et le régime des pluies devrait être modifié. Des chercheurs de l'INRA (Jean-Marc Guehl, Écophysiologie forestière, Forêts et Milieux naturels et Santé des Plantes et Environnement, Nancy) étudient l'impact de ce changement climatique sur les forêts, pour essayer de l'anticiper. La croissance des forêts pourrait s'accélérer, leur sensibilité à la sécheresse pourrait être affectée. Cette nouvelle hypothèse a dès aujourd'hui des conséquences concernant le choix des espèces pour le reboisement et concernant la gestion des forêts. *Presse info*, novembre 2000.

• *Des interactions entre climats et forêts aux niveaux local, régional ou planétaire.*
• *Forêts et eaux : relations entre écosystèmes forestiers et ressources en eau.*
Ces deux articles sont de Gilbert Aussenac, Écophysiologie forestière, Bioclimatologie et Écophysiologie, Nancy. Dossier *INRA mensuel* n°12 "La forêt et le bois. Recherches", automne 1996.

Indicateurs

• *Le fichier d'empreintes génétiques des chênes européens :* un outil pour la biologie évolutive et pour la traçabilité des produits issus du chêne.
Une carte de la diversité génétique des chênes européens vient d'être construite à l'échelle du continent, sur la base de l'étude de l'ADN de leurs chloroplastes. Grâce à l'aide de l'Union européenne, treize laboratoires issus de huit pays européens ont contribué à ces travaux, coordonnés par l'INRA (Antoine Kremer, Recherches forestières, Bordeaux, Forêts et Milieux naturels, Bordeaux-Aquitaine). Ces recherches permettent de reconstituer l'histoire de la colonisation de l'Europe par le chêne après la dernière glaciation. Ces informations sont précieuses pour la prévision des modifications de végétation dans la perspective des changements climatiques futurs. *Presse info*, décembre 2000.

• *Les endosymbioses marines : bio-indicateur des changements climatiques ?*
Pierre Allemand, Recherches intégrées en Horticulture, Environnement et Agriculture, Diversification, Antibes. *La feuille de l'INRA*, la lettre d'Antibes, avril 2001.

Maladies des arbres

• *Le réchauffement climatique peut accroître le risque de maladie des arbres.*
Quelles conséquences peut avoir le réchauffement climatique sur les maladies des plantes ? Une équipe (Benoît Marcais, Pathologie forestière, Forêt et milieux naturels, Nancy ; Marie-Laure Desprez Loustau, UMR Santé végétale INRA-ENITAB, Santé des plantes et Environnement, Bordeaux) de l'INRA de Nancy et d'une unité mixte INRA-ENITAB de Bordeaux a étudié le cas de la maladie de l'encre du chêne, rouge et pédonculé, dans le Sud-Ouest de la France. En observant des coupes d'arbres infectés, les chercheurs ont effectué une étude rétrospective de l'évolution de la maladie sur les trente dernières années. Ils ont montré que le froid hivernal limite le développement de la maladie. Un modèle permettant de prédire la survie du parasite, un champignon, *Phytophtora cinnamomi*, en fonction des conditions climatiques a alors été mis au point ; ce qui a permis l'établissement d'une carte du risque. Une nouvelle carte tenant compte du réchauffement climatique à venir est en cours d'élaboration. La zone de risque élevé y sera beaucoup plus étendue. *Presse info*, décembre 2001-janvier 2002.

•••

D'autres recherches de l'INRA apportent peut-être un éclairage sur ce problème. Ce "Point" est l'occasion pour la nouvelle mission "Changement climatique et Effet de serre" de solliciter les équipes qui seraient concernées pour qu'elles se manifestent auprès de son responsable.



Photo : D. Feuillas

Vallée du Fango (Corse).

Références bibliographiques

• Le Treut H., Jancovici J.-M. (2001). *L'effet de serre. Allons-nous changer le climat ?*, Éd. Flammarion coll. Dominos, 128 p.

• IPCC (2001) : rapports du GIEC, *développer les rapports sur le changement climatique :*

- *The scientific basis,* 994 p.
- *Impacts, adaptation and vulnerability,* 1000 p.
- *Mitigation,* 700 p.
- *Synthesis report.* Disponible en ligne :www.ipcc.ch

les quatre ouvrages Éd. Cambridge press

• Mission interministérielle sur l'effet de serre (MIES), juin 2000. *Impacts potentiels du changement climatique en France au XXIe siècle.* Éd. Imprimerie Nationale, 128 pp

• *"Programme national de lutte contre le changement climatique"* mars 2000, 220 pages, notamment "Agriculture", chapitre 6, p. 121-158. www.effet-de-serre.gouv.fr/

• Guyot G. (1997). *Climatologie de l'environnement.* Éd. Masson, 505 pp.

• Saugier B. (1996). *Végétation et atmosphère.* Éd. Flammarion, coll. Dominos, 127 pp.

• Dossiers de l'environnement :

- *Écosystèmes & changements globaux,* n°8, mai 1995, 297 p.
- *Agriculture et gaz à effet de serre,* n°10, nov. 1995, 99 p.
- Archives en ligne : *réchauffement planétaire,* www.inra.fr/dpenv/pa.htm

• Académie des Sciences (1994). *L'effet de serre.* Rapport n°31, nov., 82 pp.

• Delécolle R., Jayet P.-A., Soussana J.-F. (2000). *Agriculture et réchauffement climatique : quelques éléments de réflexion.* La jaune et la rouge. n°555, mai 2000, p.34-39

• La Recherche (1992). *L'effet de serre.* n°243, mai 92

• Dautray R. (1991). *L'effet de serre et ses conséquences climatiques : évaluation scientifique.* Éd. Cr. Académie des Sciences, La vie des sciences, 8, 89-106

• Académie d'Agriculture (1999). *Bilan et gestion des gaz à effet de serre dans l'espace rural.* vol. 85, n°6, 392 pp

• INRA, Rapport d'activité 2000, 70 p.

• Agriges, compte-rendu de l'Académie de l'Agriculture.

Voir également *INRA mensuel*

• n°6, juin-juillet 1983. *"Le climat change : l'agriculture, responsable ou victime ?"* Alain Baille, pp. 5-6.

• n°39, août-septembre 1988. *"Vitalité actuelle et passée de la forêt : le rôle majeur du climat"* Michel Becker, p. 3 .

• n°46, septembre 1989. *"Recherches sur programmes Agrobio et Agrotech"* Pierre Douzou, p. 3.

• n°52, octobre 1990, rubrique "Le Point", *"Agrotech, un programme de recherches sur l'environnement"*, pp. 28-32.

• n°73, décembre 1993, rubrique "Travaux & recherches", *"Étudier l'impact du climat sur les arbres"*, Jean-Pierre Garrec, Christophe Rose, Gilles Nourrisson, pp 6-7.

• n°74, mars 1994, rubrique "Travaux & recherches", *"Enrichissement en gaz carbonique et production du maïs"* Françoise Ruget, Olivier Bethenod, Laurette Combe, pp. 9-10.

• n°78, septembre 1994, rubrique "Le Point", *"La production de méthane chez les ruminants. Sa contribution à l'effet de serre et les stratégies pour la réduire"* G. Fonty, B. Morvan, P. Gouet, J.-P. Jouany, pp. 25-27.

• n°86, décembre 1995, rubrique "Travaux & recherches", *"Culture de colza, dégagements gazeux et environnement"* Ghislain Gosse, pp. 10-11.

• n°88, avril 96, rubrique "Travaux & recherches", *"Pollution de l'air : des variétés de tabac comme bio-indicateurs végétaux"* Jean-Pierre Garrec, p. 7

• tiré à part n°12, automne 1996, Les dossiers, *"La gestion durable des forêts : contribution à la recherche" :*

- *"Les forêts face à l'augmentation du gaz carbonique dans l'atmosphère"* Jean-Marc Guehl, pp. 13-17.
- *"Des interactions entre climats et forêts aux niveaux local, régional ou planétaire"* Gilbert Aussenac, pp. 9-12
- *"Forêts et eaux : relations entre écosystèmes forestiers et ressources en eau"* Gilbert Aussenac, pp. 18-23

• n°101, juin-juillet 1999, rubrique "Travailler à l'INRA", *"Agriculture, émissions de gaz, effets de serre et changements climatiques"* Bernard Seguin, pp. 31-32.

• n°103, janvier 2000, rubrique "INRA partenaire", *"Effet de serre. La mission interministérielle de l'effet de serre"* Claude Malterre, Jean-Pierre Dulphy, pp. 19-22.

• n°104, mars-avril 2000, rubrique "Travaux & recherches", *"Effet de serre d'origine agricole. Quels outils pour le limiter ?"* Serge de Cara, Pierre-Alain Jayet, pp. 12-13. (D'après *INRA Sciences Sociales*, octobre 1999).

Responsables scientifiques du dossier : Bernard Seguin et Pierre Stengel

Directrice de la publication : Corine Plantard / Responsable de *l'INRA mensuel* : Denise Grail

Secrétariat : Frédérique Chabrol - mél. chabrol@paris.inra.fr

Maquette et PAO : Pascale Inzérilo / Photothèque INRA : Jean-Marie Bossennec - Julien Lanson - Christophe Maître

Photo de couverture : Le grand pont : averse soudaine à Ataké. Suite des "Cent endroits célèbres d'Edo, édité par Uoya Eikishi. Utagawa Hiroshige (1797-1858). Estampe 1856-1859 Japon ©RMN-Thierry Ollivier.

INRA, Mission communication, 147 rue de l'Université, 75338 Paris cedex 07. Tél. 01 42 75 00 00

Imprimeur : Graph 2000/Photogravure :Vercingétorix/ISSN 1156-1653 n° de commission paritaire : 1799 ADAP